

Evaluation of Health effect of intermediate frequency magnetic field WCRR2013, Nov. 2013, Sydney. (accepted for poster presentation)

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

なし

H. 参考文献

World Health Organization: Environmental Health Criteria 238 Extremely Low Frequency Fields, Geneva, WHO Press, 2007

Anon: Embryonic Stem Cell Test (EST) . INVITTOX protocol no. 113. 2002

Nakasono, S., Ikehata, M., Dateki, M., Yoshie, S., Shigemitsu, T., Negishi, T., *Mut. Res.*, 649, 187-200, 2008

Sakurai T, Kiyokawa T, Kikuchi K, Miyakoshi J., *Int J Radiat Biol.* Vol.85 (10) :883-890, 2009.

別紙3 資料3

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業） 分担研究報告書

居室における中間周波電磁界に関する研究（実験動物を対象とした研究）

分担研究者 牛山 明 国立保健医療科学院生活環境部
分担研究者 樺田 尚樹 国立保健医療科学院生活環境部

研究要旨

電磁界の健康への影響に対して懸念や不安を持つ国民が多い。特に、近年、家庭内でIH調理器の普及が進んだため、IH調理器から発せられる中間周波電磁界についての懸念が増加している。しかしながら、IH調理器で利用している20kHz帯の磁界の生体影響に関する研究は不足しており、十分な科学的根拠に乏しいのが現状である。

本分担研究においては、実験動物へ21kHzの磁界をばく露できる装置を開発し、幼若ラットに対して全身均一ばく露を行った際の血液・免疫指標への影響および、妊娠ラットの胎児器官形成期に腹部への局所ばく露をおこなった際の胎児への発生への影響を調べた。

その結果、全身ばく露・局所ばく露共に、国際非電離放射線防護委員会が定める国際ガイドラインを越える磁界ばく露をおこなっても血液・免疫指標ならびに胎児の発生の催奇形性は見られなかった。

A. 研究目的

電磁界の生体作用は、低周波領域では神経や筋の刺激作用が支配的であり、高周波領域では生体の組織で電力エネルギーが吸収されることによって生じる温度上昇（熱作用）が支配的であるといわれる。

中間周波（intermediate frequency, 以下IFと略）電磁界は、これらの間に挟まれる周波数帯、すなわち300Hzから100kHz程度の周波数の電磁界であり、刺激作用を持つ低周波領域と、熱作用を持つ高周波領域の中間に属する。これまで、この周波数領域においては、工業用の誘導加熱等を除けば、生活基盤を支える技術には応用されてこなかったため、その生体影響に関する研究についても余り行われてきていなかった。しかしながら近年、オ

ール電化の推進に伴い、中間周波電磁界を使用するIH調理器の普及が進んでいる。IH調理器では基本的に20kHz～50kHzの電磁界を誘導加熱に利用するものである。しかしながらこの周波数帯の電磁界に関しては、これまで研究対象としての関心が低く、十分な科学的な知見が存在していない。そのため、2007年に発刊されたWHOの超低周波電磁界に関する環境保健クライテリア（EHC238）では以下の通りに記載され、研究の推進が必須とされている。「この領域のデータが欠落している現状を考慮し、すべてを包括する必要事項として、通常は300Hz～100kHzとされる中間周波電磁界に関する更なる研究が必要である。健康リスク評価に必要とされる知識ベースの極少数しか集まっておらず、既存の研究の多

くは結果が一貫していないので、更なる具体化が必要である。健康リスク評価のための十分な IF データベースを構成するための一般的な要件には、ばく露評価、疫学研究、ヒト実験室研究、動物および細胞 (*in vitro*) 研究が含まれる」(下線は分担研究者が加筆)

以上を背景に、本分担研究では最終的に IF 電磁界の動物に対する影響の有無を明らかにすることを目的とし、研究を進めた。本研究では、はじめに中間周波磁界を動物(ラット)に照射するためのばく露装置の開発を電気工学班と共同で行った。ばく露装置は2種類作成し、一つは全身均一ばく露用でもう一つは腹部局所ばく露用とし、平成 22 年度には前者を用いて、幼若ラットを用いた全身ばく露による血液生化学指標、血球分析指標の検討を行い、同時に免疫系の指標に対する検討をおこなった。免疫系の指標としては、①免疫毒性試験において非特異的免疫機能の評価項目の一つに挙げられるナチュラルキラー (NK) 細胞活性測定、②顆粒球の遊走能・貪食能、③T 細胞のサブセット解析を行った。また、局所用のばく露装置を用いて、平成 23~24 年度に妊娠ラットを用いて、現行の ICNIRP ガイドライン値より 400 倍高い磁束密度である 10.3mT の磁界(ラットの腹部中心における平均)を 1 日 1 時間のばく露を行った際の胎児への影響を調べた。

なお、生殖発生毒性を評価するための試験として OECD 毒性試験ガイドラインの催奇形性試験の試験法においては、ラットの使用を推奨し、交配確認後、器官形成期にあたる期間(ラットでは妊娠 7 日~17 日)で対象物質を毎日投与することとしている。本研究では、妊娠ラットを用いて器官形成期に中間周波磁界のばく露を行い催奇形性の有無について検

討を行った。

以上の研究を通じて中間周波の磁界が及ぼすヒトへの健康リスクに関して予知的・探索的な研究を行うことを目的とした。

B. 方法

B.1 血液・免疫系への影響に関する検討

B1.1 ばく露装置の開発

1.1 全身ばく露用コイル 本分担研究では、全身均一ばく露用コイル(図 1)の製作を行い実験に供した。本装置は 21 kHz で最大 3.8mT の全身均一ばく露が可能である。具体的な設計並びに仕様については電気工学班の分担研究報告書を参照されたい。

B1.2 全身用ばく露装置のばく露条件の検討

ばく露装置は構造上、作動時にコイルから発熱が生じる。この温度上昇は動物の生理状態を変化させる可能性があることから、この温度上昇をなんらかの方法で押さえる必要があると考えた。温度計測には、赤外線サーモグラフィカメラ (NeoThermoTVS-700, NECAvio 赤外線テクノロジー株式会社)、および蛍光式光ファイバー温度計 (FL-2000, 安立計器株式会社)を用いた。また、温度計測で動物の配置が必要なときは、後述の SD ラットを用いた。

B1.3 動物とばく露条件

本研究では、図 1 に示した全身均一ばく露装置を用いて、ばく露影響を検討した。動物は、Sprague Dawley (SD) ラット (日本エスエルシー株式会社)を実験に供した。ばく露は、平均磁束密度で、2mT、3.8mT とした。なお、図 2 には 3.8mT ばく露する際にラット体内で発生する誘導電流密度、誘導電解密度について、電気工学班(鈴木敬久先生)が数値計算を行った結果を示した。

本研究においては、急性影響を調べるための短期ばく露、亜慢性ばく露影響を調べるための長期ばく露の2通りのばく露を行った。短期ばく露においては実験開始時点で6~7週齢のラットを用いた。ラットをアクリル製ラットホルダーに無麻酔で保定し、所定のばく露を1日あたり3時間行った。ばく露は連続する3日間にわたり行い、4日目に麻酔下において心臓穿刺による全採血および脾臓の摘出を行い、分析に供した。また、長期ばく露実験においては、実験開始時点で、4~5週齢のラットを用いて、短期ばく露と同様の方法で1日1時間のばく露を連続する14日間行い、15日目に採血および脾臓の摘出を行い分析に供した。なお、短期ばく露実験においては、ケージコントロール群、シャムばく露(偽ばく露)群、2mTばく露群、3.8mTばく露群の4群とし、長期ばく露実験においては、ケージコントロール群、シャムばく露群、3.8mTばく露群の3群を作成した。

B1.4 分析用血液の採取

採血の際は血液生化学分析用にヘパリンリチウム含有微量採血管(ヘルスウェーブ社)、及び血球分析用にEDTA含有微量採血管(ヘルスウェーブ社)にそれぞれ300 μ l程度ずつ分注し、残りの血液は後述する顆粒球調整およびリンパ球タイピング用に50mM EDTAを含むPBS 1容量に血液が9容量になるよう混和した。

B1.5 血液生化学的分析

ヘパリンリチウム含有微量採血管に採取した血液は直ちに動物用・生化学自動分析装置VS2(アバクシス社)を用いて分析した。分析には、事前にすべての試薬や希釈液などがセットされた試薬ローターを用いるが、本研究においてはComprehensive Diagnostic Profile

(#500-0038)ローターを用いて、以下の主要14項目の定量を行った。アルブミン(ALB)、アルカリホスファターゼ(ALP)、アラニンアミノトランスフェラーゼ(ALT)、アミラーゼ(AMY)、尿素窒素(BUN)、カルシウム(CA)、クレアチニン(CRE)、グロブリン(GLOB)、グルコース(GLU)、カリウム(K⁺)、ナトリウム(Na⁺)、リン(PHOS)、総ビリルビン(TBIL)、総タンパク質(TP)

B1.6 血球分析

EDTA含有微量採血管に採取した血液は直ちに動物用・自動血球計測装置HM2(アバクシス社)を用いて分析を行った。本装置で測定した指標は以下の通りである。

白血球関連：総白血球数、リンパ球数、単球数、顆粒球数

赤血球関連：赤血球数、ヘモグロビン、ヘマトクリット、平均赤血球容積、平均赤血球ヘモグロビン量、平均赤血球ヘモグロビン濃度、赤血球分布幅

血小板関連：血小板数、血小板%、平均血小板容積、血小板分布幅

B1.7 ナチュラルキラー細胞活性測定

摘出した脾臓から調整したリンパ球浮遊液をNK画分を含むエフェクター細胞として使用した。また、マウスリンパ腫細胞YAC-1(理化学研究所バイオリソースセンターより提供)をターゲット細胞としてNK活性を測定した。従来NK活性測定においては、⁵¹Crを用いたRIアッセイが用いられていることが多いが、本研究においては、傷害されたターゲット細胞から放出されるラクトースデヒドロゲナーゼ(LDH)の活性を呈色反応で定量化する方法によって測定を行った。NK細胞活性はCytoTox96 Non-Radioactive Cytotoxicity Assay(Promega社)を用いて、LDH定量法によっ

て測定し、%Cytotoxicity は下記の式で求めた。この LDH 定量法は、細胞の破壊に伴い放出されてくる安定な細胞質性酵素である LDH を定量する方法であり、本方法で得られる結果は ^{51}Cr 放出細胞性試験と同等であると報告されている。

%Cytotoxicity はキットに従って、下記の式で求めた。

$$\% \text{ Cytotoxicity} = [(\text{Sample} - \text{Effector Spontaneous} - \text{Target Spontaneous}) / (\text{Target Maximum} - \text{Target Spontaneous})] \times 100.$$

B1.8 顆粒球走化性の測定

測定に用いる顆粒球は Percoll の不連続密度勾配遠心分離法により調製した。具体的には、密度 1.1065g/ml および 1.1071g/ml に調製した Percoll 液を 15ml の 2 心管に 3ml ずつ重層し、その上に PBS で 2 倍に希釈した血液 2.5ml を重層した。遠心管は 700g で 40 分間遠心分離し、上から 2 番目の層に集合する顆粒球画分を回収し、混入した赤血球を溶血し、Hanks 液にて 2 回洗浄を繰り返したものを顆粒球画分とした。本法により、顆粒球%が 80~90% (フローサイトメトリーによる) の細胞懸濁液が得られる。

走化性は、細胞動態解析装置 EZ-TAXIScan (GE ヘルスサイエンス社) を用いて検討を行った。上記の顆粒球を約 $1 \times 10^6/\text{ml}$ に調製し、マニュアルにしたがって、経路の厚み $4 \mu\text{m}$ の空間を動く顆粒球を画像として 30 分間記録した。なお、走化性因子として、N-Formyl-Met-Leu-Phe (fMLP, Sigma-Aldrich 社) を用いた。細胞の移動度を 30 秒ごとに 30 分間記録し解析を行った。解析は、画像処理ソフト MetaMorph (モレキュラーデバイス社) により画像処理を行った後に、輝点追跡ソフト G-Track (ジーオングストローム社) を用いて、顆粒球の移動度を求めた。

B1.9 顆粒球貪食能の測定

上述した方法に従って回収した顆粒球を用いて、貪食能を測定した。100 倍に希釈した蛍光ビーズ (Fluoresbrite Microspheres, $1.0 \mu\text{m}$ YG) と顆粒球を混和し、 37°C で 1 時間浸透しながらインキュベートした。その後遠心により洗浄し、貪食されていない蛍光ビーズを除去した。細胞をフローサイトメーター Cytomics FC500 (ベックマンコールター社) で解析を行った。

B1.10 T細胞サブセットの検出

EDTA 採血を行った末梢血の一部は T 細胞サブセットの検出のために用いた。実験では $75 \mu\text{l}$ の血液に 10 倍量 ($750 \mu\text{l}$) の溶血剤 VersaLyse を加え、10 分以上静置し赤血球を溶血させた。その後、PBS で洗浄を 2 回繰り返し、最終的に $50 \mu\text{l}$ の PBS に再懸濁した。細胞懸濁液に PE (Phycoerythrin) 標識抗-CD3 抗体 ($0.2 \mu\text{g}$)、FITC 標識抗-CD4 抗体 ($0.2 \mu\text{g}$)、PE-Cy7 (Phycoerythrin-Cy7) 標識抗-CD8 抗体 ($0.2 \mu\text{g}$) を加え抗体の結合反応を氷上で 30 分行った後に PBS で洗浄した。細胞を $500 \mu\text{l}$ の PBS で再懸濁し、フローサイトメーター FC500 (ベックマン・コールター社) で検出を行った。

B1.11 統計処理

統計処理はいずれも一元配置分散分析によって行い、有意差が認められた場合は Dunnett 法により、ケージコントロール群との比較を行った。統計処理は、SPSS を用いた。

B1.12 動物実験における倫理的配慮

本研究の実施にあたっては、国立保健医療科学院動物実験委員会の承認を得た上で、「厚生労働省の所管する実施機関における動物実

験等の実施に関する基本指針」および関連法令、規程を遵守して行った。

B2 催奇形性に関する検討

B2.1 磁界ばく露装置

実験動物用中間周波局所ばく露装置は、平成22年度の本補助金を用いて製作したものをを用いた(図11)。コイルは直径約10cmの円形であり、その中央を中心として強い磁界を発生することが可能なものである。コイルに通電した際に生じる熱については、コイル管内を冷却水循環装置(東京理化学器械:CA-1114B)を用いて20℃の冷却水を強制循環させることにより制御できるようになっている。コイルはバリア区域内の動物実験専用室に設置した。飼育室内は温度が $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\pm 20\%$ となるように制御した。今回はばく露群用のコイルだけでなく別室に設けたシャムばく露群用のコイルにも同様の冷却水循環装置を接続し、冷水を流すことでポンプからの微振動なども同条件になるようにした。また、平成23年度からの改良点として、コイルの周りをシリコンチューブで巻いて、その中を25℃に調節した水を循環させて、コイルからの発熱をその循環水で吸熱し動物の部位の温度を一定に保持した(図12)。

B2.2 動物

実験に使用した動物は、Slc:SD(Splague Dawley)系統のラットで日本エスエルシー(株)から購入した。購入は実験開始日の1週間以上前におこない、実験(交配)開始日に雄は12週齢、雌は10週齢となるように購入時の週齢を調整し、実験開始まで飼育室内で馴化した。動物の飼育は、アイソレーションラック(Super Rat 1400TM夏目製作所(株))を用いて、飼育中は専用ケージに1匹ずつ動物をいれ飼育をおこなった。飼育中、塩素を添加

した水、ならびに飼料(放射線滅菌飼料FR-2、10kGy、フナバシファーム)は自由摂取とし、床敷きにはアルファドライを使用して定期的に床敷きを交換した。

交配と群分けは以下のとおり行った。10週齢の雌ラットの交配適期を判定するために、ラット用膣インピーダンス・チェッカー(MK-11、室町機械(株))を用いて、製品のプロトコルに従い膣インピーダンス値を測定した。その膣インピーダンス値が3.0を超える値を示した雌は交配適期であると判断し、その時点から12週齢の雄ラットを1:1で同居させた。翌朝、膣スメアをとり、ギムザ染色を行ったのちに顕微鏡下で精子の有無を調べ、精子を確認した場合を交配確認日(妊娠0日)とした。交配が確認された場合は、同居を終了させ、以後は雌1匹で飼育を継続した。交配成立後、動物は毎日体重の測定、目視に健康観察をおこなった。交配が成立したラットは無作為にシャム群、ばく露群、ケージコントロール群に割り付けをおこない、最終的に各群のN数が20になるまで実験を行った。

B2.3 磁界ばく露

妊娠を確認した動物は飼育室において飼育を継続し、毎日午前中に体重を記録すると共に、妊娠7日~17日まではばく露の操作を行った。ばく露群及びシャム群の動物は専用のアクリル製保定器にラットを入れた状態で、ばく露装置のコイルの上に固定し、1時間のばく露またはシャムばく露を行った(図11)。ばく露条件はばく露装置の項に述べたとおりである。1時間のばく露終了後は直ちにラットをもとのケージに戻し、無用な拘束によるストレスを与えないようにした。なお、ケージコントロール群は保定器に一切入れずに、ケージ内で飼育を継続した。ばく露期間中は毎日1回体重を測定するとと

もに、動物を観察し外見上の健康状態を確認した。

B2.4 血液学的検査

雌親は妊娠 20 日に解剖を行った。動物はインフルラン吸入麻酔により前麻酔をおこない、ケタミン-キシラジン混合液により深麻酔を施した。開腹し心採血をおこない、血液は直ちに血液生化学分析用にヘパリンリチウム含有微量採血管（ヘルスウェーブ社）、及び血球分析用に EDTA 含有微量採血管（ヘルスウェーブ社）にそれぞれ 300 μ l 程度ずつ分注し混和した。

B2.5 血液生化学の分析

ヘパリンリチウム含有微量採血管に採取した血液は直ちに分析した。その方法については B1.5 に記載した方法と同様である。

B2.6 血球分析

EDTA 含有微量採血管に採取した血液は直ちに動物用・自動血球計測装置 HM2（アバクシス社）を用いて分析を行った。その方法については B1.6 に記載した方法と同様である。

B2.7 剖検

雌親は生化学分析と血球分析のための採血の後、脱血させ胸腺を摘出した。また、開腹しあとで、胎児の空間的な位置情報がわかるように写真撮影・記録を行った。その後子宮を観察し胎児数、着床痕数を調べた。また胎児は生存胎児を対象として、胎児の表面の水分をガーゼで吸収したのちに体重を測定した。摘出した胎児は、基本的に子宮内での並び位置に基づき 1 匹ずつ交互に外表・内臓検査用、骨格検査用に二分した。

B2.8 外表検査・内臓検査

外表検査・内臓検査用の標本については摘出胎児を 1 検体ずつ 10% 中性緩衝ホルマリン液（和光純薬）に浸漬し、数日後にブアン固定液（和光純薬）に交換し、さらに数日後飽和ピクリン酸水溶液に交換して剖検に供した。

B2.9 骨格検査

胎児の骨格をエタノールで固定し、その後アルシアンブルー、アリザリンレッド S による染色を常法に従って行い、脱色、透明化を経て、最終的にグリセリンに浸漬した骨格標本を作成し検査に供した。

なお、外表検査、内臓検査、骨格検査は外部の専門機関に検査を委託した。作業者に対しては動物のばく露条件を伏せ、盲検法にて検査を実施した。

B2.10 動物実験の倫理的配慮

本研究は、国立保健医療科学院動物実験委員会の承認を得て実験をおこなった。実験の実施にあたっては、関連法令、指針を遵守しておこなった。

B2.11 統計処理

得られた数値データに関しては、一元配置分散分析により群間の検定を行い、群間差があった場合は、ケージコントロール群を基準として有意水準 5% で検定を行った。統計処理には統計パッケージソフト PASW Statistics(SPSS) ver.18 (日本 IBM) を使用した。

C. 結果

C1. 血液・免疫系への影響に関する検討

C1.1 ばく露装置の諸条件の検討

全身均一ばく露装置について、コイルは縦

型、横型のいずれにも配置可能な仕様とし、ラットの配置を考えるとラットの体軸の3方向いずれに対しても磁界を発生させることが可能であった。すべての場合について、体内に誘導される誘導電流密度と誘導電界密度をシミュレーションによる計算したところ図12のようになった。その結果、ラットの体に対して、背腹方向に磁界を発生させることが、より大きな誘導電流密度、誘導電界密度を発生させることが可能であり、本研究のばく露では、すべての実験において磁界を背腹方向に発生させて実験をおこなった。なお、このときに発生する誘導電界密度は、ICNIRPガイドライン(2010年度改訂版)で示されている2.7V/mに比べて、約1.74倍である。

また、全身均一ばく露用のばく露装置は構造上、作動時にコイルを流れる電流によって熱を発生する。この熱によってコイルの内部、すなわちラットを配置する部位の温度が上昇することがわかり、熱対策が必要となった。この空間的な温度上昇を抑制するため、ファンで送風をする空冷方式とチューブ内に20℃に保った水を流す水冷方式の併用を検討し、安定的に温度を制御できる装置を完成させた。

その結果、図1に示すように、最大出力である3.8mTのばく露を行っても、ラットの部位での温度変化は室内の空調設定値(通常23℃)±1℃の範囲におさまる装置となった。本研究では以後、この条件でのばく露を繰り返した。

C1.2. 全身均一ばく露による血液生化学・血球指標への影響

C1.2.1 短期ばく露実験

1日1時間、3日間連続のばく露を行い、4日目に血液を採取し分析した結果を、表1に生化学指標、表2に血球指標について示した。

その結果、生化学指標において、分散分析

の結果いくつかの項目で統計的に有意な差を示し、さらにケージコントロールを基準にしてアドホック分析を行ったところ、表1に示した部分において有意な差を認めた。しかしながら、磁界ばく露がこれらの差を発生させる原因であると考えると2mTおよび3.8mT群で量反応関係を示すはずであるが、そのような現象は確認できないこと、また、後日、追試実験を行ったところ、同様の傾向は見られなかったことを考慮すると、観察された差は必ずしも生物学的な意味を持たないと考えられた。

また、血球分析においては、分散分析において有意な差を認めなかった。

なお、それぞれの群の間での体重には有意な差を認めなかった。

C1.2.2 長期ばく露実験

1日1時間のばく露を14日間連続して行い15日目に採血して分析をした結果について、生化学指標については表3、血球分析については表4に示した。

これらについても一部の指標において、統計的には有意差を観察したが再現性が十分に得られていないため、生物学的な意味を持たない可能性がある今後さらに検討が必要である。

なお、それぞれの群の間での体重には有意な差を認めなかったが、ケージコントロール群に比べて保定した群は若干体重が少ない傾向にあり今後、保定に対するストレスなどを検討する必要がある。

C1.3. ナチュラルキラー細胞活性

NK活性を検討した結果を図6に示す。図に示すとおり、短期ばく露、長期ばく露のどちらにおいても、磁界ばく露による有意な影響を認めなかった。

C1.4. 顆粒球走化性、貪食能

Percoll の不連続密度勾配遠心分離法によって分離した顆粒球の走化性について検討を行った結果を図7及び図8に示す。本研究においては、顆粒球の移動を30分間、30秒おき計61枚の画像に納め、それをAVIムービーに変換し、画像解析ソフトで細胞の輝度を追跡する方法により細胞の平均移動速度を求めた。その結果、走化性物質が添加されない場合は、移動速度が低い細胞が多くを占めるのに対して、走化性物質 fMLP の存在下では細胞の移動速度が上昇する。しかしながら、移動速度の変化などに磁界ばく露が有意な影響を与えることはなかった。

また、貪食能について検討を行ったところ、図9に示すとおり結果になった。短期ばく露、長期ばく露のどちらにおいても、ばく露による影響は認めなかった。

C1.5. T細胞サブセットの検出

T細胞の起源である造血幹細胞は骨髄から供給され、胸腺に入ると急速に分裂、増殖、分化を繰り返すことが知られている。T細胞はその分化過程において、幹細胞から前駆細胞 (CD4-/CD8-) を経て、TCR 弱陽性 (CD4+/CD8+) を示す細胞のみがセレクションされ、成熟T細胞へと分化する。ゆえに何らかの外的および内的要因により、T細胞の分化の過程に異常が発生した際、胸腺細胞におけるCD4あるいはCD8の分画を調べることにより分化過程の異常を検出することが可能である。

そこで本研究では、電磁波をばく露したラットにおいてT細胞由来の免疫機構の異常の有無を確認するため、T細胞表面マーカーであるCD3/CD4/CD8を用いたフローサイトメトリーにより、CD4/CD8比の検出、

CD4+/CD8+ (double positive) およびCD4-/CD8- (double negative)を呈するT細胞の検出を試みた。末梢血中のCD3陽性細胞におけるCD4/CD8比CD4+/CD8+ (double positive) およびCD4-/CD8- (double negative)を呈するT細胞の検出を試みた。分析の典型例について図10に示した。

その結果、表5に示したとおり、長期(14日間)の磁界ばく露がこれらの数値に有意な影響を与えることはなく、T細胞の分化には磁界ばく露が影響をあたえることはないと考えられた。

C2 催奇形性に関する検討

C2.1. ばく露中の温度制御

平成23年度の研究において、ばく露を行うと、ばく露コイル近傍において若干の温度上昇が認められたため、方法で述べたように、コイルの周りに一定温度に保った水を循環させ、温度の安定化を目指した(図12)。その結果、図12に示すように、ばく露中の温度が安定するような環境を形成することが可能であった。水の循環はシャム群、ばく露群ともに同様に行うことにより、両者の間に発生する磁界以外の要因による影響を排除することが可能であると判断した。

C2.2. 妊娠動物の健康状態

実験ではばく露群、シャムばく露群、ケージコントロール群各20匹計60匹を実験に供した。ばく露群では周波数20.8kHz、コイル中心磁束密度(ラットの腹部中心表面)は10.30mTの正弦波形の磁界を胎児の器官形成期である妊娠7日~17日の毎日午前中に1時間のばく露を行った。ばく露中、母獣の健康状態は良好であった。

C2.3. 妊娠動物の体重

体重に関しては、全ての群の母獣の体重は順調に増加した。表6には、妊娠0日（妊娠確認日）、7日、18日、20日（解剖日）のそれぞれの群の平均体重と、妊娠中の体重増加量、および磁界ばく露期間中（7日～17日）の体重増加量を示した（表6）。その結果、妊娠中の各測定日においての体重の平均値の比較では、ケージコントロール群に比べ、ばく露群、シャム群の双方において小さい傾向が見られたが、有意差は見られなかった。また、妊娠中の体重増加量についても同様に有意差は認められなかった。しかしながら、ばく露期間中の体重増加量について同様に検討した場合、ばく露群、シャム群共にケージコントロール群に比べ、体重の増加量が有意に小さかった。体重が少ない理由としてはばく露を行う際に1時間保定をおこなう操作が動物にとってストレスになっている可能性がある。

一方、強いストレスがかかると動物の胸腺が萎縮し小さくなることが知られているため、解剖時において胸腺を摘出しその重量を測定した。その結果、ケージコントロール群では $0.385 \pm 0.067\text{g}$ であったのに対して、ばく露群では $0.375 \pm 0.078\text{g}$ 、シャム群では $0.360 \pm 0.082\text{g}$ であり、統計的有意差は認められず、重大なストレスがかかっているとはいえないと判断した。本研究では、動物の腹部に局所的に磁界をばく露した際の影響を明らかにすることを目的としているため、拘束のストレスがあったとしても許容できる範囲のものであると考えた。

C2.4. 妊娠動物の血液生化学的検査・血液学的検査

剖検を行った妊娠20日目の母獣から採血をおこない、その血液生化学的検査、および血液学的検査（血球検査）を行った。その結果を表7および表8に示した。その結果、検討

した全ての項目において群間の差は見られず、ばく露の影響はないものと考えられた（表7）。

C2.5. 着床数、胎児数、胎児重量などの比較
着床数、胎児数、胎児重量などについての結果を表9にまとめた。着床数はばく露群 13.6 ± 1.7 匹、シャム群 13.8 ± 1.2 匹、ケージコントロール群 13.5 ± 1.4 匹であり、群間の有意差は認めなかった。また着床痕数は、ばく露群11匹、シャム群11匹、ケージコントロール群16匹、死亡胎児は、ばく露群1匹、シャム群2匹、ケージコントロール群1匹であった。着床痕や死亡胎児は特定の母獣に頻発していることはなく、均等な頻度での発現が見られた。各群の生存胎児数はばく露群 13.0 ± 2.0 匹、シャム群 13.2 ± 1.2 匹、ケージコントロール群 12.3 ± 1.9 匹であり、統計的な有意差は認めなかった。

また、胎児の体重について雄のばく露群 $3.49 \pm 0.35\text{g}$ 、シャム群 $3.55 \pm 0.30\text{g}$ 、ケージコントロール群 $3.62 \pm 0.39\text{g}$ であり、雌に関しては、ばく露群 $3.34 \pm 0.29\text{g}$ 、シャム群 $3.38 \pm 0.33\text{g}$ 、ケージコントロール群 $3.40 \pm 0.39\text{g}$ でありそれぞれ群間の統計的な有意差は認めなかった。

C2.6. 胎児の外形異常

検査胎児の外表観察異常についての結果を表10および表11に示す。本研究では、全380検体を調べたが、そのうち一部の胎児に異常が認められた。異常に関しては、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形(mulformation)、構造的に通常の範囲を超えた変化であっても生存に影響しないものを変異(variation)と定義し解析した。異常と判定したもののうち、奇形を呈する個体は見られなかった。変異に関しては、全て口蓋ヒダ不整列の所見であった。口蓋ヒダ不

整列の発生頻度は、ばく露群で 28.9%、シャム群 35.3%、ケージコントロール群 38.5%であり、ばく露条件による有意差は見られなかった。

C2.7. 胎児の内臓異常

検査した胎児の内臓異常についての結果を表 10 および表 11 に示した。全 380 検体を調べたが、そのうち一部の胎児で異常が認められた。異常に関しては、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形、構造的に通常の範囲を超えた変化であっても生存に影響しないものを変異と定義し解析した。表 10 に示す通り、奇形はばく露群で 0 (発生頻度 0%)、シャム群は 2 匹 (発生頻度 1.5%)、ケージコントロール群は 2 匹 (発生頻度 1.6%) であり、条件によって奇形が頻発することはなく有意差も認められなかった。奇形の所見としてはシャム群では心室中隔筋性部欠損が 1 匹、心房中隔欠損が 1 匹であった。また、ケージコントロール群では、鎖骨下動脈起始異常と鎖骨下動脈食道後方走行が同一個体中に見られるものが 1 匹、心室中隔筋性部欠損が 1 匹であった。

一方で変異については、表 11 に示す通り、ばく露群の 23.4%、シャム群の 37.6%、ケージコントロール群の 28.6%に見られて、カイ自乗検定では、有意差が認められた ($p=0.04$)。内訳では、多くが胸腺頸部遺残であった。また左臍帯動脈、肺分葉過剰裂がそれぞれ数例見られた。

C2.8. 胎児の骨格形成の異常

検査した 387 胎児検体の骨格形成についての結果を表 10 および表 11 に示した。異常に関しても、外形・内臓異常と同様に、発育や生存に影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形、構造的に通常の範囲を超えた変化であっ

ても生存に影響しないものを変異と定義し解析した。奇形に関しては、ばく露群 1 匹 (発生頻度 0.8%)、シャム群 5 匹 (発生頻度 3.8%)、ケージコントロール群 0 匹 (発生頻度 0%) という結果であった。シャム群において高い頻度で見られたが、その理由は明確ではない。しかしながら、ばく露群では増加傾向はみられないため、磁界が催奇形性をもたらす要因になるということはない。奇形胎児の所見としてはすべて「胸椎体二分骨化」であった。変異に関しては、全 387 胎児検体中、67 検体で異常が確認され、内訳はばく露群 20 匹 (発生頻度 15.2%)、シャム群 26 匹 (発生頻度 19.5%)、ケージコントロール群 21 匹 (発生頻度 15.7%) であった。内訳は、その他は全て変異とみなせるものであり、「胸椎体ダンベル状骨化」が骨格変異個体の約 3 分の 2 を占めていた。それ以外に短小過剰肋骨、頸肋、胸椎体半椎体、波状肋骨が見られた。

C2.9. 母獣の腹単位の奇形発生頻度

OECD ガイドラインを始め、催奇形性の評価については、異常を呈した胎児の数で評価するよりも、異常を呈した胎児をもつ母獣の割合で評価をおこなうことが推奨されている。本実験でも母中の腹単位での奇形発生頻度を比較した。母獣の腹単位で考えると、内臓奇形に関しては、各群 20 匹に対して、ばく露群 1 匹、シャム群 2 匹、コントロール群 2 匹であり、特定の母獣に奇形が集中することもなく、自然確率的な発生であると考えられた。また、骨格奇形について母体レベルで考えると、各群 20 匹の母数に対し、ばく露群 1 匹、シャム群 3 匹、ケージコントロール群 0 匹であった。

内臓と骨格を総合して考えると、奇形を呈した胎児を持った母獣はばく露群 1 匹、シャム群 4 匹、ケージ群 2 匹であり、ばく露群に有

意に奇形発生率が多いということにはなかった。

D. 考察

D1 血液・免疫系への影響に関する検討

本研究では、ラットに 21 kHz の中間周波磁界を最大で 3.8mT ばく露した際の血液・免疫系の影響を調べた。ばく露はラットを固定する必要があることから、1 日 1 時間として、最大 15 日間のばく露を行った。観察の指標としては体重、血液生化学などの基本的な毒性学的データに加えて、免疫機能に焦点を当てた。生化学的データでは、ケージコントロール群と比べて、一部の指標において有意差を観察したがそれぞれのデータで、用量依存的な関係を示さず、磁界の生物学的な影響ではないと考えられる。血液学的データは、任意の有意な変化を示さなかった。また本研究では、好中球の走化性・貪食能、リンパ球の細胞傷害活性といった免疫機能の指標に対しても影響を示さなかった。

本研究では、磁束密度 3.8mT でのばく露を行ったが、それは国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドラインである $27\mu\text{T}$ (21kHz) の 140 倍に相当する。しかしながら、生体反応に対しては、磁界によって誘導される誘導電界の方がより確定的な要因として働く可能性も考えられる。本装置を用いた際のラット体内に発生する誘導電界を数値計算したところ 4.7V/m であり、これは ICNIRP の規定する基本制限の 1.7 倍であった。したがって生体影響がさらに強い誘導電界の環境下において発生する可能性もある。しかしながら、我が国で使用されている IH 調理器から発する中間周波磁界は基本的に ICNIRP のガイドラインである $27\mu\text{T}$ を下回るものであり、その磁界にばく露される調理者体内に誘導される誘導電界は基本制限よりも低い値である

ことを考慮すれば、IH 調理器の使用で免疫系の影響が生じる可能性はない、あるいは極めて低いと考えられる。

D2 催奇形性に関する検討

本研究では、中間周波磁界が胎児の発生に与える影響を調べるため、ラット胎児の器官形成期にあたる期間で磁界ばく露をおこない、その生殖発生毒性を評価した。これまでに IH 調理器から放射される磁界を問題にした催奇形性試験は西村らによっておこなわれた研究があるのみである。西村らはラットに一樣な垂直磁界をばく露し、その催奇形性が見られないことを明らかにしているが、いくつかの考慮すべき問題点も考えられる。具体的には、実際の IH 調理器での調理作業は妊婦の腹部が調理器に接近した状態で使用するため、妊婦 (胎児) に対して不均一な磁界に晒される点が実際のばく露と異なる点と、西村らの用いた磁界強度が $0.2\mu\text{T}$ であり、誘導電界に換算した場合、ヒトとラットでは磁界が通過する断面積には大きな差があることからとそれほど強い強度ではない点が挙げられる。本研究ではこれらの点を考慮し、ラットの腹部に局所的に強磁界をばく露する方法を選択し実験を行った。腹部に局所的に磁界に晒すことはすなわち、母獣と胎児にとって不均一な磁界に晒されることを意味する。局所的に強磁界に晒すため、我々は平成 22 年度の本研究で専用のばく露コイルを開発した。コイルでばく露するためにはラットを専用の保定筒に保定してばく露をおこなう。そのため妊娠ラットの数値モデルを用いて、詳細なドシメトリを実施することが可能となった。ドシメトリに関しては工学班の項を参照して頂きたい。平成 23 年度はそのコイルを用いて催奇形性の実験を行った。その結果、通電によりコイル自身に生じる発熱が非常にわずかであるが

コイル付近の温度上昇を招き、それが結果に影響する可能性があることが分かった。本年度は、たとえわずかな温度上昇であっても、磁界以外の影響の可能性は否定できないことから、その可能性を排除するために、温度を安定化するための水ループをコイルに装着し実験を行った。

動物実験では 21kHz の正弦波形磁界を SD ラットの胎児器官形成期である妊娠 7 日～17 日にばく露し、妊娠 20 日に解剖して胎児を摘出し胎児を常法に従って検査した。本研究では、ばく露群とシャムばく露群並びにばく露時の保定を一切行わないケージコントロール群の計 3 つの群を作り、各群 20 匹の母獣を用意して結果を比較した。これら 3 群の間で、妊娠中の母獣の体重増加に関しては、ばく露群、シャム群においてケージコントロール群に比べ増加量が有意に少ないことが明らかになったが、これは磁界の影響ではなく、ばく露中の保定のストレスによるものであると推察された (表 6)。しかしながら、血液学的検査 (表 7)、血液生化学検査 (表 8)、胸腺重量においては有意な差は見られなかった。また生存胎児数、胎児 1 匹あたり重量においても群間の有意な差は見られなかった (表 9)。また胎児の外表検査や内臓検査、骨格検査をおこない異常の有無を調べた。異常に関しては、内臓観察の分類において、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形 (malformation)、構造的に通常の範囲を超えた変化であって生存に影響しないものを変異 (variation) と定義することが多いため、本研究でもこれに従うこととした。

結果の項で示したとおり、全部で 60 匹の母獣から 767 匹の胎児検体を得て、その半数を外表及び内臓の異常検索用に、半数を骨格の異常検索用に供した。催奇形性として問題となる奇形の発生に関しては、ばく露群で有意

に多く発生することはなく、磁界によって催奇形性が発生するということはないと考えられた。なお、本研究では外形奇形は 0%、内臓奇形は 1.1%、骨格奇形は 1.6%、全体として 1.3%の奇形発生率であったが、竹内らがまとめた SD ラットの生殖に関するバックグラウンドデータ (複数研究をとりまとめたもの) では、外形奇形が平均 0.29%、内臓奇形が平均 2.64%、骨格奇形が 0.26%となっており、特段の差は見られないと考えられる。

本研究では、通常の範囲を超えてはいるが生存に影響しない変異についても検討を行った。変異の種別に見ると、外形検査では口蓋ヒダ不整列が、内臓検査では胸腺頸部遺残が、骨格検査では胸椎体ダンベル状骨化が多く見られた。一般的に口蓋ヒダ不整列は、発生頻度が増加している場合、投与用量に対応して他の部位の異常が増加する可能性があるかもしれないと考えられている一般的な変異であるがシャム群、ケージコントロール群に比べて、ばく露群ではむしろ低い発生率であった。結果の項に示したとおり、シャム群において、内臓変異がケージコントロール群に比べて多く見られたが、ばく露群ではケージコントロール群と同等であったため、磁界の有無による影響、保定の有無による影響とは無関係であり、その原因は不明である。Huuskonen らは鋸型歯状の 20kHz 磁界をばく露したマウスで少なくとも 3 個以上の骨格変異型をもった胎児の数が増加していることを報告している。その実験では骨格変異型の増加の他にもばく露による化骨進行度の増加と減少の双方の変化が報告されており、そのような骨格に関連した変化はばく露した磁界の種類や動物の種類、系統に影響を受けると述べている。今回の研究では化骨進行度に関しては詳細な検討は行っていないため、比較はできなかった。

本研究において平成 24 年度は、動物実験用

に開発した局所用ばく露装置を用いて妊娠ラットの胎児形成期に強い中間周波磁界のばく露実験を行い胎児への影響の有無を調べ、磁界ばく露による胎児の奇形の有意な発生は見られないことを報告した。平成24年度に得られたこの結果はOECD毒性試験ガイドラインの催奇形性試験で推奨される各群20例の母獣を用いてデータを収集し、磁界の影響が見られないことを明らかにしたことから、一般的な化学物質の催奇形性データの対比も可能となるものである。

また、データの収集にあたり、磁界以外の要因、たとえばコイルの発する熱についても除去する実験系を用いたため、信頼性の高いデータを得られたと考えている。本研究で得られた結果は現時点ではデータが少ない生活環境における中間周波磁界のリスク分析に資する基礎資料として活用可能な貴重なデータとなった。

E. 結論

幼若ラットに1日1時間、国際ガイドラインを大きく越える3.8mT、21kHzの中間周波磁界ばく露を最大15日間にわたってばく露をしても、本研究で検討した限りでは血液・免疫系への影響は見られないことを明らかにした。

また妊娠ラット腹部表面中心で21kHz、約10mTの正弦波磁界ばく露を胎児の器官形成期にあたる妊娠7~17日まで1日1時間おこない、20日目に解剖し胎児への影響を調べたところ、磁界が奇形の発生に影響を与えないことが明らかになった。

IH調理器で使用されている正弦波磁界での動物実験の例は少なく、リスク評価に向けての科学的なエビデンスの一つとして活用されることが期待される。

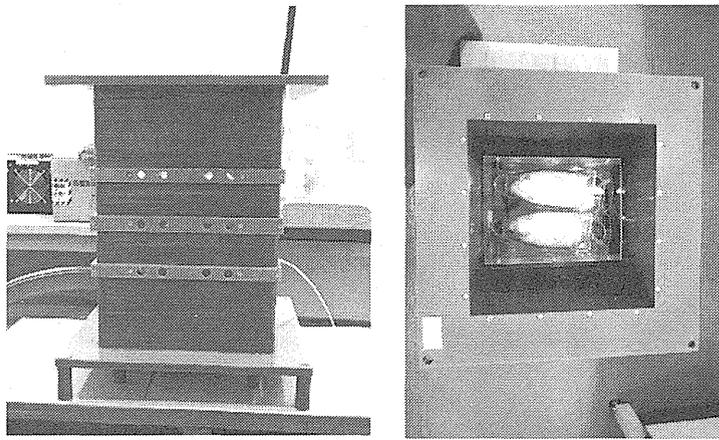


図1 全身均一ばく露用コイルの概観（左）と保定した動物をコイル内に配置し、真上から見た状態（右）

誘導電流密度 (A/m ²) (最大/平均)	9.64/0.57	5.75/0.31	6.44/0.38
誘導電界密度 (V/m) (最大/平均)	34.29/4.71	22.81/2.68	41.71/3.16

図2 全身均一ばく露用コイルに3.8mT相当の電流を負荷した際にラットの体内に発生する誘導電流密度および誘導電界密度の最大値と平均値

コイルは縦置き横置きに対応可能であり、ラットの配置方向により磁界の方向を3通り設定できる。

なお、ICNIRP ガイドライン（2010年改訂版）では、一般公衆において2.7V/mが基本制限値に設定されている。

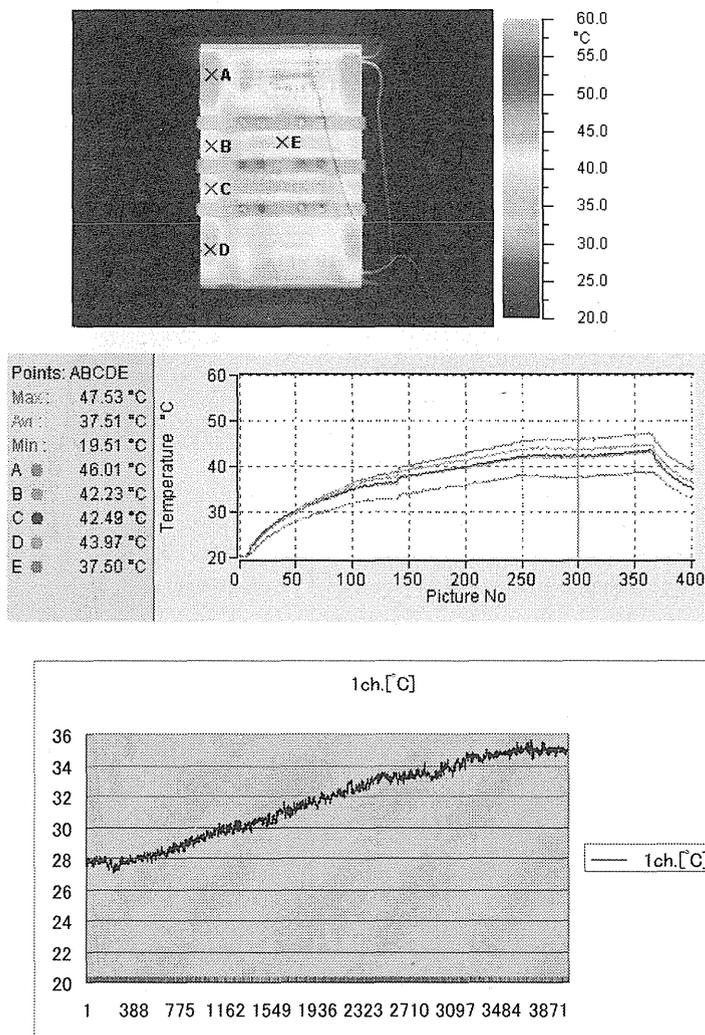


図3 全身均一ばく露用コイルに磁束密度 3.8mT 相当の電流を負荷した際のコイル温度

(A) 60 分後のサーモカメラ像と (B) 各点の 60 分間の温度変化 (ピンクの線が 60 分に相当する。)

(C) ラットホルダー内部 (動物を入れていない状態) の 60 分間の温度変化 (ファイバー温度計による計測)

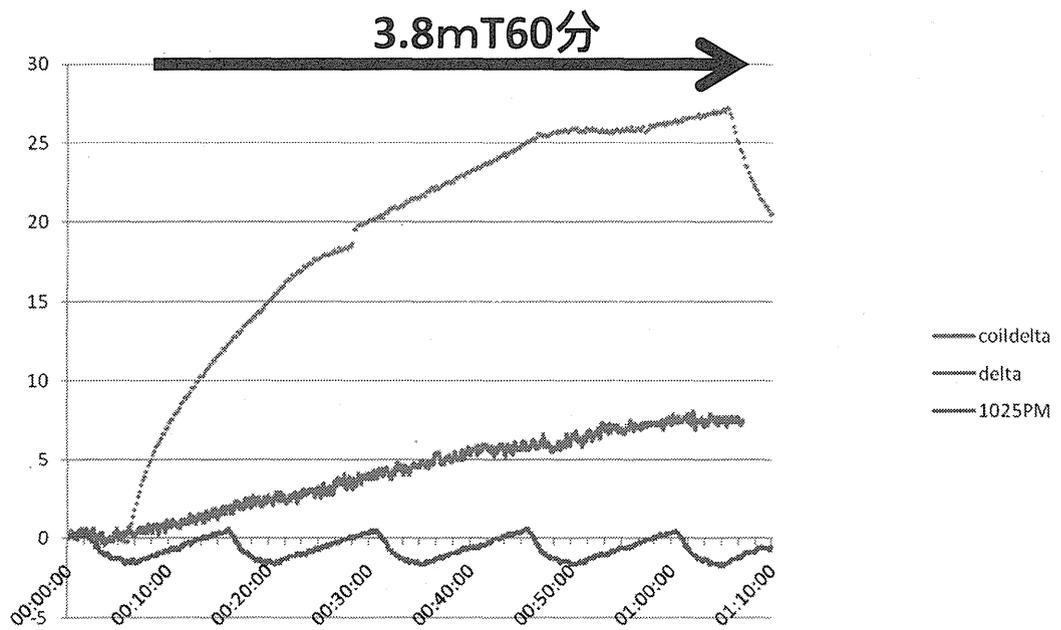
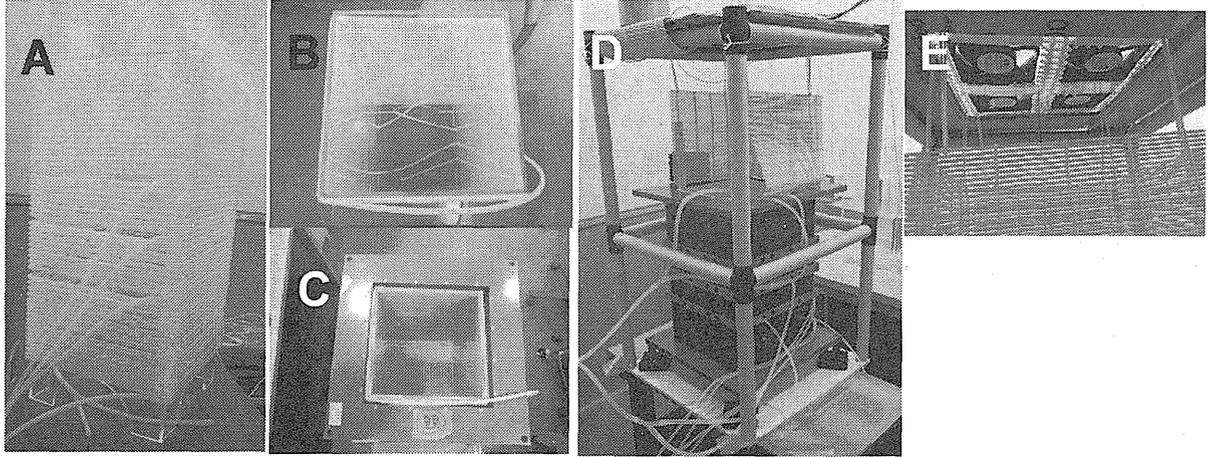


図4 コイルの熱制御

上段写真：コイル内部の温度上昇を防ぐために、コイルの内側に流路を作り実験中は20度の水を循環させるとともに、上部に設置したファンで送風を行った。

下段グラフ：3.8mTで60分のはく露を行った際の、コイル表面温度（みどり線）および動物部位の温度（赤線）。参考のため、熱制御を行わなかった場合の動物部位の温度を青線で示す。

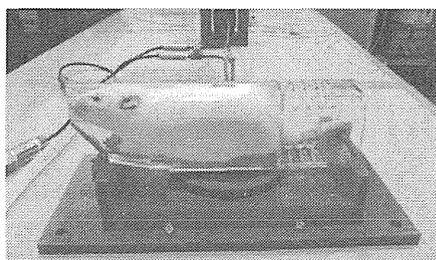
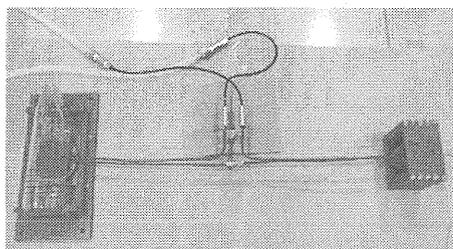


図5 本年度新たに開発した局所ばく露用コイル

上写真：全体像

下写真：ラットを保定器に入れてコイルの上で保定した状態

表1 短期（3日間）ばく露サンプルにおける血液生化学指標の結果

	(unit)	cage control n=14	シャム n=12	2mT n=12	3.8mT n=12
ALB	アルブミン g/dL	4.54 ± 0.15	4.85 ± 0.27 *	4.61 ± 0.19	4.78 ± 0.19 *
ALP	U/L	554.9 ± 87.4	566.1 ± 108.5	612.9 ± 96.8	505.9 ± 103.1
ALT	GPT U/L	56.5 ± 10.11	55.5 ± 8.82	61.2 ± 8.3	51.6 ± 6.2
AMY	アミラーゼ U/L	938.1 ± 85.7	940.3 ± 109.7	882.8 ± 61.2	906.2 ± 100.9
TBIL	総ビリルビン mg/dL	0.19 ± 0.27	0.2 ± 0	0.2 ± 0	0.19 ± 0.03
BUN	尿素窒素 mg/dL	18.7 ± 3.34	19.1 ± 2.8	19.3 ± 3.4	20 ± 3.8
Ca ⁺⁺	mg/dL	11.2 ± 0.29	11.1 ± 1.66	10.7 ± 1.92	11.6 ± 0.35
PHOS	リン mg/dL	10.08 ± 0.66	9.77 ± 0.93	10.15 ± 0.64	9.72 ± 0.79
CRE	クレアチニン mg/dL	0.3 ± 0.88	0.29 ± 0.10	0.28 ± 0.06	0.23 ± 0.05
GLU	グルコース mg/dL	283.4 ± 47.2	232 ± 25.6 *	254.3 ± 34.5	242.9 ± 50.2 *
Na ⁺	mmol/L	139.1 ± 1.83	141.3 ± 2.53	140.5 ± 4.50	140.2 ± 1.60
K ⁺	mmol/L	6.06 ± 0.55	6.13 ± 0.51	5.95 ± 0.46	5.9 ± 0.49
TP	総タンパク g/dL	5.75 ± 0.23	6.04 ± 0.30	5.76 ± 0.23	6.03 ± 0.25 *
GLOB	総グロブリン g/dL	1.24 ± 0.17	1.19 ± 0.15	1.14 ± 0.12	1.24 ± 0.12

* p<0.05 (vs cage control)

表2 短期（3日間）ばく露サンプルにおける血液分析結果

	(unit)	cage control n=14	シャム n=12	2mT n=12	3.8mT n=12
WBC	白血球 10 ⁶ /mL	6.06 ± 2.07	5.3 ± 1.64	5.18 ± 1.70	5.57 ± 1.68
LYM	リンパ球 10 ⁶ /mL	4.99 ± 1.69	4.39 ± 1.51	4.06 ± 1.38	4.52 ± 1.33
MON	単球 10 ⁶ /mL	0.19 ± 0.08	0.17 ± 0.06	0.17 ± 0.09	0.68 ± 1.80
GRA	顆粒球 10 ⁶ /mL	0.83 ± 0.38	0.74 ± 0.24	0.96 ± 0.54	0.87 ± 0.50
RBC	赤血球 10 ⁹ /mL	6.86 ± 0.28	7.02 ± 0.71	7.02 ± 0.32	7 ± 0.34
HGB	ヘモグロビン g/dL	14.1 ± 0.45	14.1 ± 1.48	14.6 ± 0.54	14.5 ± 0.42
HCT	ヘマトクリット %	35.4 ± 1.7	35.7 ± 3.0	36.2 ± 1.7	35.9 ± 1.3
MCV	赤血球容量 fl	51.8 ± 1.8	51 ± 2.8	51.4 ± 1.8	51.4 ± 2.2
MCH	平均ヘモグロビン量 pg	20.7 ± 0.83	20.1 ± 0.44	19.7 ± 5.48	20.8 ± 0.98
MCHC	平均ヘモグロビン濃度 g/dL	40.1 ± 1.62	39.4 ± 1.8	40.5 ± 2.0	40.4 ± 1.5
RDWc	赤血球分布幅 %	16.7 ± 0.56	16.8 ± 0.5	16.6 ± 0.3	16.7 ± 0.25

表3 長期（14日間）ばく露サンプルにおける血液生化学指標の結果

	(unit)	cage control n=11	sham n=12	3.8mT n=12
ALB	アルブミン g/dL	4.66 ± 0.25	4.77 ± 0.22	4.79 ± 0.31
ALP	g/dL	538.82 ± 125.74	540.42 ± 109.54	486.42 ± 59.46
ALT	GPT g/dL	57.91 ± 8.73	63.25 ± 10.91	57.75 ± 5.5
AMY	アミラーゼ U/L	915.64 ± 70.28	839.75 ± 76.63*	854.42 ± 73.74
TBIL	総ビリルビン U/L	0.2 ± 0	0.2 ± 0	0.21 ± 0.03
BUN	尿素窒素 U/L	20.82 ± 2.23	21.33 ± 3.5	20.33 ± 2.67
CA	mg/dL	11.38 ± 0.33	11.36 ± 0.37	11.19 ± 0.3
PHOS	リン mg/dL	10.82 ± 0.83	10.36 ± 0.7	9.72 ± 0.4*
CRE	クレアチニン mg/dL	0.26 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.27 ± 0.05
GLU	グルコース mg/dL	312.64 ± 37.9	272.75 ± 28.37*	257.5 ± 42.88*
NA	mg/dL	141.36 ± 2.16	142.08 ± 2.47	141.08 ± 2.23
K	mg/dL	5.85 ± 0.46	5.5 ± 0.63	5.26 ± 0.6*
TP	総タンパク mmol/L	5.84 ± 0.24	5.86 ± 0.18	5.88 ± 0.24
GLOB	総グロブリン mmol/L	1.17 ± 0.13	1.08 ± 0.11	1.07 ± 0.2

* p<0.05 (vs cage control)

表4 長期（14日間）ばく露サンプルにおける血液分析結果

	(unit)	cage control n=11	sham n=12	3.8mT n=12
WBC	白血球 10 ⁶ /mL	5.85 ± 2.59	5.65 ± 1.6	4.63 ± 1.29
LYM	リンパ球 10 ⁶ /mL	5.03 ± 2.22	4.67 ± 1.27	3.78 ± 1.11
MON	単球 10 ⁶ /mL	0.17 ± 0.07	0.15 ± 0.08	0.13 ± 0.06
GRA	顆粒球 10 ⁶ /mL	0.65 ± 0.34	0.83 ± 0.37	0.73 ± 0.25
RBC	赤血球 10 ⁹ /mL	7.2 ± 0.32	7.46 ± 0.32	7.46 ± 0.33
HGB	ヘモグロビン g/dL	14.69 ± 0.56	15.09 ± 0.59	14.98 ± 0.49
HCT	ヘマトクリット %	37.37 ± 1.75	38.09 ± 1.98	37.98 ± 2.09
MCV	赤血球容量 fl	52.05 ± 2.92	51.21 ± 2.22	51 ± 2.96
MCH	平均ヘモグロビン量 pg	20.41 ± 0.66	20.25 ± 0.53	20.08 ± 0.49
MCHC	平均ヘモグロビン濃度 g/dL	39.31 ± 1.5	39.66 ± 1.4	39.5 ± 1.52
RDWc	赤血球分布幅 %	16.78 ± 0.65	16.76 ± 0.53	16.91 ± 0.99
PLT	血小板 10 ⁶ /ml	680.81 ± 137.29	657.88 ± 222.91	652.89 ± 126.91
PCT	血小板% %	0.44 ± 0.06	0.41 ± 0.14	0.4 ± 0.08
MPV	平均血小板容量 fl	6.15 ± 0.23	6.26 ± 0.43	6.14 ± 0.26
PDWc	血小板分布幅 %	31.44 ± 0.8	31.79 ± 1.41	31.73 ± 1.15

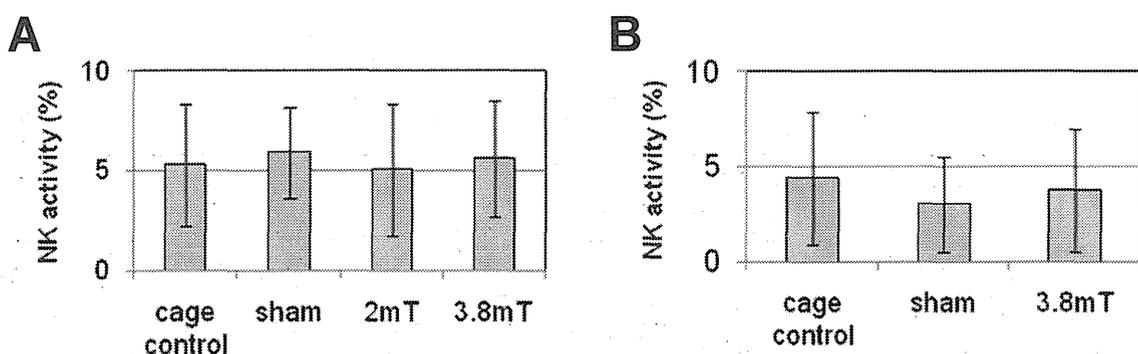


図6 磁界ばく露によるNK活性への影響の検討

A 3日間ばく露の結果、B 14日間ばく露の結果

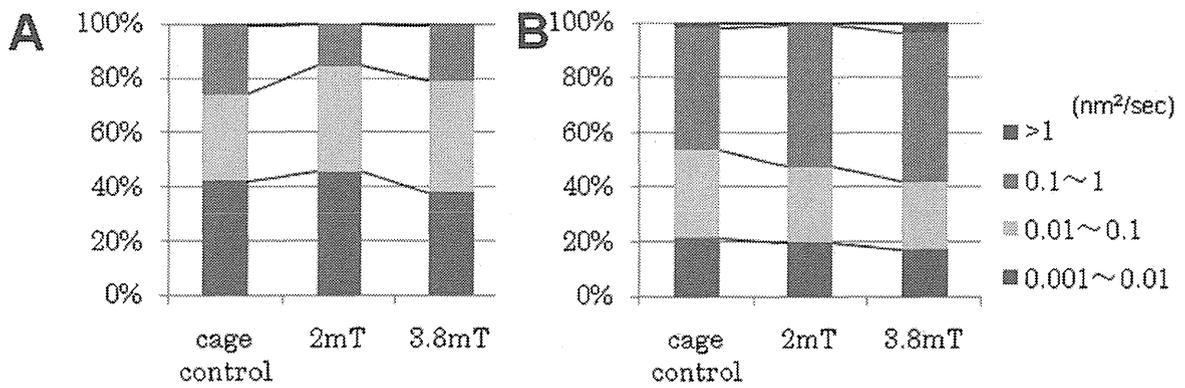


図7 短期（3日間）ばく露における顆粒球走化性に及ぼす影響についての検討
 Aは走化性物質非存在下における、顆粒球の速度分布を示す。BはfMLPを 10^{-7} mol加え走化性を惹起した際の顆粒球速度分布を示す。
 それぞれのばく露条件から得た血液中の顆粒球の速度分布には顕著な影響を与えない。

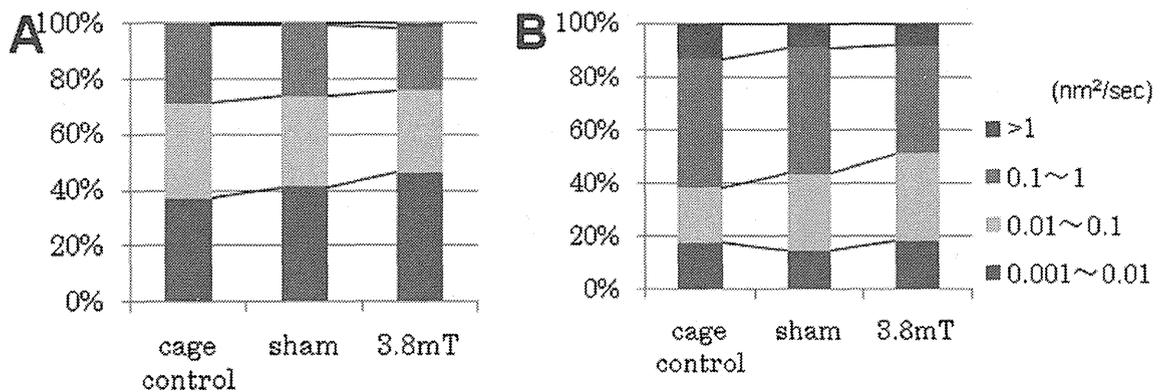


図8 長期（14日間）ばく露における顆粒球走化性に及ぼす影響についての検討
 Aは走化性物質非存在下における、顆粒球の速度分布を示す。BはfMLPを 10^{-7} mol加え走化性を惹起した際の顆粒球速度分布を示す。
 それぞれのばく露条件から得た血液中の顆粒球の速度分布には顕著な影響を与えない。